空中水资源及其降水转化分析

李家叶¹, 李铁键^{1,2,3*}, 王光谦^{1,2,3}, 魏加华^{1,2,3}, 钟德钰^{1,2,3}, 苏洋¹, 傅旭东¹

1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

2. 青海大学三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016;

3. 三江源协同创新中心, 西宁 810016

* 联系人, E-mail: litiejian@tsinghua.edu.cn

2018-02-21 收稿, 2018-04-27 修回, 2018-05-17 接受, 2018-09-10 网络版发表

国家重点研发计划(2017YFC0403600, 2016YFE0201900)、国家自然科学基金重点项目(91547204)和国家电网公司科技项目(52283014000T)资助

摘要 本文在回顾空中水资源利用的愿景和相关研究成果、分析空中水资源的概念和内涵的基础上, 定义了白水, 用以代表空中水资源. 白水指的是通过地表某处上空的统计意义上具备降水潜力的水物质通量. 白水和其他水资源一样, 一般表述为年度水量, 其本质是水物质的更新通量. 将空中水物质的水平运动垂直积分投影到地表二维空间, 对于地表任一点, 白水的量纲为 $[L^2 T^{-1}]$, 与地表水资源常用的 $[L^3 T^{-1}]$ 不同. 将某地的降水通量与相应时段的白水的比值定义为白水降水效率, 量纲为 L^{-1} , 代表白水每运动单位距离产生的降水量占其自身的比例. 将白水概念扩展到地表流域, 则可通过沿流域边界积分得到进入某一流域的白水, 量纲为 $[L^3 T^{-1}]$. 将该流域上空全部白水输送路径上的降水效率沿各自路径积分后加权平均, 即得到流域的白水降水转化率(无量纲)为流域内的降水占进入该流域的白水的比例, 可以采用降水量除以白水与径流量的 $1/2$ 之差来近似计算. 本文采用再分析数据研究了我国大陆附近的白水降水效率的空间分布特征, 并选择长江、黄河、珠江、三江源流域开展相关特征参量对比分析. 结果表明, 白水降水效率是反映气候和地理条件的降水转化能力的公允度量, 可直接用于不同地区的对比分析; 流域的白水降水转化率可用于分析流域空地水资源循环中的数量关系. 研究和评估白水及其降水转化特征, 是空地水资源耦合分析及空中水资源开发利用的基础. 通过技术手段提高局部地区的白水降水转化率, 并与地表水利工程联合调控, 有望实现一定规模的空地水资源耦合利用, 是水资源开源的新机遇.

关键词 空中水资源, 白水, 降水效率, 降水转化率, 空地耦合

地球水循环系统由大气、海洋、陆地等部分共同组成. 在水循环过程中, 大气中发生持续的水物质输运, 其中部分水物质以降水的形式降落到地表, 一部分产生径流, 赋存在河道、湖泊中, 或进入地下含水层中, 均可被人类直接利用; 另一部分短暂留存在土壤中, 一般只能被植被有效利用, 并经蒸散发转化为气态水, 回归到大气中^[1].

水资源研究一般只关注陆地地表水与地下水参与的循环过程, 狭义水资源概念仅限于河道、湖泊和

地下含水层中可被人类直接利用的径流性水资源, 而不包括被植被等生态系统利用的降水, 水资源的利用实践也主要涉及地表水和地下水的开发与配置^[2,3]. 考虑到水资源的间接价值, Falkenmark^[4]提出了绿水的概念, 将植被蒸散发所消耗的水资源定义为绿水, 而把传统地表水资源和地下水资源定义为蓝水. 广义的绿水概念包括了植被的有效蒸腾和地表、冠层及水面蒸发, 是一定区域一定时间内的蒸散发总量^[5], 为认识水循环过程中不同环节的水物质所

引用格式: 李家叶, 李铁键, 王光谦, 等. 空中水资源及其降水转化分析. 科学通报, 2018, 63: 2785–2796

Li J Y, Li T J, Wang G Q, et al. Atmospheric water resource and precipitation conversion (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2785–2796, doi: 10.1360/N972018-00162

承载的资源功能提供了新的视角.

从通量的角度理解,对于忽略跨流域引水和流域系统储水量变化的外流流域,在较长时段内的降水量(如年降水量),为相应的绿水通量(即年蒸散发量)与蓝水通量(即为年径流量)之和^[6].从水循环的角度分析,全球陆地总降水的65%转化为绿水,其余35%转化为蓝水^[7,8].绿水虽然不是直接的水资源,但对人类所处的自然环境和生活生产意义重大,例如,全球粮食虚拟水贸易中超过90%来源于绿水^[9].绿水的评价及管理研究^[9,10]拓宽了水资源的范畴,是水资源、植被生态等学科研究的一大进展.

绿水概念使水资源研究和管理范畴延伸到了陆地降水总量,但仍然无法封闭水资源循环再生的整个过程.地球上的水物质总量巨大,而大气中的水物质蓄存量很小,其巨大的输送通量才是陆地水资源的根本来源.在水资源短缺、生态保护需求强烈和全球气候变化等背景下,对空中水物质输送、降水及其蓝绿水分配的总体认识与定量研究也越来越深入.例如,Trenberth等^[11]采用多种再分析数据,定量揭示了全球海陆间水循环的物质和能量过程.刘国纬^[12]研究了水文循环的大气过程,系统论述了全球尺度、洲尺度、中国大陆及各大区域的大气水汽含量、水汽输送、水分平衡以及陆地-大气系统水分交换的基本事实与主要特点,并开展了定量分析.张学文等^[13]建议设立“大气水文学”学科分支,以大气中水分的存在、运动、变化、作用和应用技术为研究对象,构建大气水文学的理论框架,完善地球水科学的学科体系.

本文作者认为,从水资源的角度研究空中水物质的输送与转化规律,应明确提出空中水资源的概念与定量评估方法,形成对水资源理论体系的拓展;还应开展空中水资源的开发理论研究与利用技术实践,研究空中水物质、空中水资源与蓝、绿水的相互转化关系,研究空中水资源开发利用的基本模式和关键技术,从而拓宽传统水资源管理的视野,促进广义水资源的统筹开发.王光谦等^[14,15]提出了天空河流的概念,解释了其内涵,讨论了空中水资源开发利用将涉及的关键科学和技术问题,并以黄河中上游流域为例进行了空中水资源的特征分析,初步论述了空中水资源的概念和研究意义.

本文在前述工作^[14,15]的基础上,用白水表示空中水资源,开展了以下工作:提出了白水的定义和计

算方法;给出了单点的白水降水效率和流域的白水降水转化率的定义和计算方法;分析了我国大陆附近的白水降水效率空间分布,并对比我国主要地表流域的白水输入量和白水降水转化率;对研究方法 with 成果进行总结和展望.

1 白水的定义与计算方法

1.1 相关研究进展

人类从空中获取更多水资源的设想由来已久,20世纪40年代以来,世界各国不断开展人工增雨试验和工程实施,积累了成熟的人工增雨技术,并缓解了大量的局部地区气象干旱问题^[16].但是,空中水资源一直缺少一个明确合理的定义.

1978年,联合国教科文组织(UNESCO)根据国际水文计划(IHP)的成果公布了全球空中水汽总量为12900 km³,如果将这些水汽全部凝结成液态水并均匀分布于地球表面,约相当于25.4 mm水深^[17].1994年,Vonder等^[18]总结了国际上不同学者和机构对全球空中水汽含量的计算结果,得出平均值为25.5 mm,不同数据相差在10%左右.国内学者也开展了此类工作,刘国纬^[19]采用全国100多个探空站的探空资料分析了我国空中水汽含量的时空分布,得出我国大陆空中水汽总量为144.5 km³,折合成平均水深为15.1 mm.

除了以上针对空中水汽含量的分析研究,也有大量工作以云中的液态和固态水含量为研究对象^[20-24].1993年,Drake^[21]发表了基于国际卫星云气候计划(ISCCP)观测数据的全球云分布和云水路径(CWP,包含液态云水和固态云水)结果;1994年,Weng和Grody^[22]采用当时最先进的微波辐射计SSM/I进行云中的液态水含量反演.2007年,李兴宇等^[24]采用ISCCP的云水路径数据进行分析,得出我国空中平均云水含量为0.07 mm.

以上工作均以垂直积分水汽含量或云水含量为对象开展研究,其中云水量也被部分学者称为云水资源量,两者表征的都是某区域上空一个较长时期平均的水物质含量.但是,基于大气水物质含量的分析难以与降水、蒸发、径流等水循环过程中的通量建立空地水量平衡关系.因此,还有一类工作研究了区域的空中水物质输入通量或净输入通量.1954年,Benton和Estoque^[25]利用探空资料研究了北美大陆上

空的水物质输送和水分平衡,根据高斯定理建立了流域内降水减蒸发与空中水物质输送沿边界积分的关系.1968年,Rasmusson^[26]用更丰富准确的气象观测资料,详细分析了北美大陆上空不同气压层的水汽输送特征及其水量平衡关系.1995年,Oki等^[27]通过欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析数据计算了全球前70个大流域的水汽净输入量,即输入量与输出量之差,并与径流量进行对比,得到了较好的一致关系,但也指出准确观测水汽输送和径流数据的重要性.在国内,刘国纬和周仪^[28]采用探空资料计算了1977年我国空中水汽总输入量为18569 km³,总输出量为16346 km³,净输入量为2223 km³,与我国当年的径流量误差为12%.蔡森^[29]采用美国国家环境预报中心(NCEP)的再分析资料计算了2011年我国空中水物质总输入量为22.6万吨(22600 km³),总输出量为20.5万吨(20500 km³),净输入量为2.1万吨(2100 km³),与刘国纬和周仪^[28]的结果基本一致.

除了状态量和通量的区别外,空中水资源的定义及内涵还涉及另一个维度,即水资源的可利用性.蔡森^[29]总结了不同气象学者对云水资源概念的辨析,提出云水资源是存在于云中可以通过一定技术手段被人类利用的那部分水物质,但不包括自然降水过程已经沉降的部分.从水利角度看,王浩等^[3]总结了国内外学者关于水资源概念的理解,提出水资源是对人类社会经济发展和生态环境保护具有效用的淡水资源,其来源为大气降水,赋存形态为地表水、土壤水和地下水,是不区分自然产量和人为增量的.因此,作者认为将水资源概念从陆地扩展到空中,其内涵不应仅是人工影响天气可增加的那部分降水,而应是进入一定区域内具有发生降水潜力的全部水物质,包括自然降水的部分.

王光谦等^[14,15]认为,水汽含量和云水路径等概念无法反映具有降水潜力的水物质的再生更新量,与水利学科对水资源的定义不一致,难以直接用于水资源开发利用研究和水资源管理等工作.王光谦等^[15]给出了空中水资源的初步概念,是在一定时段内(如年)累计的可降水的空中水物质的更新量,与地表河流的天然径流量具有类似的内涵.考虑到水资源是指可资利用或有可能被利用的水源,因此在空中水资源的定义中,“可降水”只考虑大气中具备天然或人工转化为降水潜力的那部分水物质质量,与气象

领域的大气可降水量(precipitable water)不同.文献[15]受篇幅所限,并没有给出具体明确的空中水资源定义,同时文中提出的空中水资源的降水转化率为流域宏观的降水转化率,受流域尺度与形状的影响,在不同流域之间对比分析时存在可比性的问题.因此,本文在深入分析空中水资源内涵的基础上,采用“白水”这一名称提出空中水资源的一种具体定义和计算方法,并给出了表征其降水转化特征的分析方法.

1.2 白水的定义

本文将白水定义为通过地表某处上空的统计意义上具备降水潜力的水物质通量.考虑到空中转化为降水的水物质一般伴随云的出现而存在,常规认知中云的颜色一般为白色,因此,参照按颜色定义的蓝水和绿水,本文采用了白水(white water)这一名称.白水和其他水资源一样,一般以年度水量来衡量,其本质是水物质的更新量.

上述定义与气象领域定义的云水资源或空中水资源主要有两方面不同.第一,本文定义考虑的是较长时间内通过地表某处的空中水物质的更新量,是长时段的通量,不是状态量;第二,本文定义考虑了输入水物质的可利用性,既不是空中水物质总量,也不是云中固液水物质质量.图1显示了均一边界条件下,白水沿输送路径的水物质转化关系.图1(a)中的灰色部分是总水物质扣除背景水汽后具备降水潜力的白水,其转化为降水后,一部分形成地表径流或补给地下水,另一部分通过蒸散发又返回大气.

由于空中的水物质无法完全转化为降水,其中不具备降水可能性的部分(图1(a)中点阵填充背景部分)会随着大气运动被持续输送,但不产生水资源价值.本文将这部分水物质称为背景水汽,背景水汽含量的高低与所在纬度、海拔高程等因素有关,在固定地点又随季节变化而变化(如图1(b)所示).为了计算各地点各时间的背景水汽,本文采用多年序列进行统计,将某地某年内顺序日(ordinal date)晴空条件下(云量少于10%)的垂直积分水物质含量的多年平均值作为该地该顺序日的背景水汽含量.

1.3 白水的计算方法

本文的定义和计算暂不考虑大气的垂向分层,白水及其相关变量均指地表到一定高度大气的总量

图1 白水概念示意图。(a) 白水沿输送路径的转化关系;(b) 某地上空总水物质与背景水的年内过程

Figure 1 Schematic diagrams of the concept of white water. (a) The conversion of white water along its transport path; (b) the process of total column atmospheric water and background water in a year over a certain area

或平均量. 为简化表示, 以下各物理量均为垂向积分或平均后的值, 不再另作说明.

用 q 表示一定时间内从空中通过某处的总水物质质量, 其表达式:

$$q = \frac{\int_t TCAW \cdot \|u\| dt}{\int_t dt}, \quad (1)$$

式中 t 为时间; $TCAW$ (total column atmospheric water) 为该处上空垂直积分总水物质含量, 量纲为 $[L]$; u 为风速矢量, $\|u\|$ 表示通过该处的风速大小, 量纲为 $[L \cdot T^{-1}]$; 因此, 可以得到 q 的量纲为 $[L^2 \cdot T^{-1}]$, 表征的是通过该处的总水物质通量.

同理, 可以得到一定时间内从空中通过某处的白水量 q_w 的表达式:

$$q_w = \frac{\int_t TCWW \cdot \|u\| dt}{\int_t dt}, \quad (2)$$

式中 $TCWW$ (total column white water)代表该处上空具有降水潜力的水物质含量, 考虑在某些时刻空中水物质含量 $TCAW$ 可能小于背景水汽含量 $TCBW$

(total column background water), 此时不宜将负值累计到白水, 应将此时的 $TCWW$ 赋值为0, 如式(3)所示:

$$TCWW = \begin{cases} TCAW - TCBW, & TCAW \geq TCBW \\ 0, & TCAW < TCBW \end{cases}, \quad (3)$$

同理, 白水的量纲为 $[L^2 \cdot T^{-1}]$, 与地表水资源常用的 $[L^3 \cdot T^{-1}]$ 量纲不同. 这是由于空中水物质的水平运动垂直积分投影到地表后充满二维空间, 而不像地表河流一样存在近似一维的河槽. 因此, 为了与地表流域进行宏观的耦合分析, 参照上述定义过程, 给出流域白水的计算方式.

用 Q 表示一定时间内从空中进入某一流域的总水物质质量, 其表达式:

$$Q = \frac{\int_t \oint_s \frac{1}{2} TCAW \cdot (u \cdot n + |u \cdot n|) dS dt}{\int_t dt}, \quad (4)$$

式中 S 为流域边界; n 为 S 上指向流域内的单位法向量; $TCAW$ 为边界上垂直积分空中总水物质含量, 是位置的函数, 量纲为 $[L]$; $\oint_s dS$ 表示沿边界积分. 积分后, 可以得到 Q 的量纲为 $[L^3 \cdot T^{-1}]$, 表征的是进入

该流域的总水物质通量。

同理,可以得到一定时间内从空中进入某一流域的白水通量 Q_w 的表达式:

$$Q_w = \frac{\int_t \oint_s \frac{1}{2} TCWW (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} + |\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}|) dS dt}{\int_t dt}, \quad (5)$$

式中 $TCWW$ 是边界上水物质中统计意义上在该流域内具有降水潜力的部分,量纲为 $[L]$,是位置和时间(季节周期)的函数,如式(6)所示:

$$TCWW = \begin{cases} TCAW - \overline{TCBW}, & TCAW \geq \overline{TCBW} \\ 0, & TCAW < \overline{TCBW} \end{cases} \quad (6)$$

与单点情况不同,从流域边界输入的水物质需要扣减其在流域内不具备降水潜力的背景水汽 $TCBW$;而 $TCBW$ 随位置而变化,可以采用文献[14]介绍的天河河的研究成果沿水物质输送路径进行适当的空间运算后代入式(6)。本文为了简化计算,采用某时刻整个流域内的背景水汽的空间平均值(表示为 $\overline{TCBW}$)来简化处理,不再考虑区域内的空间异质性,但考虑背景水汽的时间变化; $\overline{TCBW}$ 依然是年内顺序日的函数。

从水循环的长时间尺度看,不考虑流域内水物质储蓄量的变化,径流由降水的一部分转化而来,降水由白水 Q_w 的一部分转化而来,而 Q_w 是总水物质通量 Q 的一部分。3个比例均由当地的气候和地理条件决定,在大尺度上具有较为稳定的地域和季节规律,对这些比例的研究具有较大意义。

2 白水的降水转化分析方法

气象领域关注降水过程中水凝物与降水量的比例关系,一般称之为降水效率(precipitation efficiency),涉及云降水物理过程。1952年, Braham^[30]将降水效率定义为降水量与假绝热上升凝结的水量之比;1980年, Hobbs等^[31]将降水效率定义为降水强度与凝结速率之比,并分析了冷锋处的降水效率为30%~50%。

水资源领域更关注降水量和输入水物质量以及本地蒸散发量的宏观比例关系,统称为水文循环参数^[17,32]。为表示区域上空水物质转化为降水的效率,刘国纬和汪静萍^[33]、王可丽等^[34]曾计算降水量与垂直积分水物质含量之比,用以表达降水效率。一段时间累计的降水量和某时刻或时段平均垂直积分水物

质含量的量纲虽然同为 $[L]$,但时段降水量是通量的时间积分,是过程量,水物质含量是状态量或其时间平均,两者的比例之间隐含着降水的累计时间和空中水物质的更新时间两个不同的时间变量,其物理基础不明确,计算方法也难以统一。

王光谦等^[15]提出,空中水资源的降水转化率可用降水量除以同期输入的空中水资源量和本地蒸散发量之和计算,得到黄河源区的降水转化率为16.3%,黄河上中游的降水转化率为22.3%。这样定义得到的降水转化率是一段时期累计降水量与对应时段的空中水资源量的比值,是一个无量纲数。但忽略了空中水资源在水平输送过程中,降水转化是沿程发生的这一物理实质。因此,降水转化的公允度量应采用 $[L^{-1}]$ 量纲,与流域边界无关。为了更好地对比评估不同地区空中水资源的降水转化效率,本文提出了单点的白水降水效率 $[L^{-1}]$ 量纲这一物理概念,并在此基础上重新推导了流域的白水降水转化率(无量纲)。

2.1 单点的白水降水效率

将某地的降水通量与白水的比值定义为白水降水效率 WPE (white water precipitation efficiency),如式(7)所示:

$$WPE = \frac{P}{q_w}, \quad (7)$$

式中 P 表示在某时段内发生的降水量,量纲为 $[L \ T^{-1}]$;因此可以得到 WPE 的量纲为 $[L^{-1}]$,表征的是白水每运动单位距离产生的降水量占其自身的比例。

如采用栅格数据进行具体计算,则上述的 P 为该栅格某时段内的降水量, q_w 为该栅格同样时段内白水通量的时间积分,再将两个量的比值赋值到该栅格上,则得该栅格的白水降水效率。对所有栅格进行此操作,即可以得到白水降水效率的空间分布。

2.2 流域的白水降水转化率

水资源、河流管理等研究中常以流域为分析对象。因此,上述单点的白水降水效率难以满足对流域的宏观把握,流域的白水降水转化率 WPR (white water precipitation conversion ratio)有其现实应用价值。首先定义白水沿输送路径经过一段距离 L 后的降水转化率,用 WPR_L 表示,等于路径上的总降水除以输送过程中白水通量的平均值 $\overline{q_w}$,如式(8)所示:

$$WPR_L = \frac{\int_0^L P dl}{q_w}, \quad (8)$$

需要注意的是, 式(8)的分子是降水 P 对输送路径的积分, 量纲为 $[L^2 T^{-1}]$, 而 $\overline{q_w}$ 的量纲与 q_w 一样, 因此 WPR_L 就变成了一个无量纲数, 表示通过一段距离后白水转化的降水占其自身的比例. 这时再对不同白水输送路径的 WPR_L 进行加权操作, 权重取为每个输送路径白水的各自平均值, 即 $\overline{q_w}$, 是宽度 W 的函数可以得到流域的白水降水转化率 WPR , 如式(9)所示:

$$WPR = \frac{\int_0^W \overline{q_w} \cdot WPR_L dw}{\int_0^W \overline{q_w} dw}, \quad (9)$$

式中, W 表示流域的总宽度, dw 代表宽度上的微元. 将式(8)代入式(9), 可得:

$$WPR = \frac{\int_0^W \overline{q_w} \frac{\int_0^L P dl}{q_w} dw}{\int_0^W \overline{q_w} dw} = \frac{\int_0^W \int_0^L P dl dw}{\int_0^W \overline{q_w} dw}, \quad (10)$$

其中分子 $\int_0^W \int_0^L P dl dw$ 就是流域总降水 P_A , 分母 $\int_0^W \overline{q_w} dw$ 指的是流域上全部输送路径上白水通量的平均值之和. 如果假定流域内径流是均匀产生的, 如图1(a)所示, 则白水沿输送路径线性递减(灰色填充的梯形区域); 此时, $\int_0^W \overline{q_w} dw$ 等价于白水输入量与输出量的平均值. 根据空地水分平衡关系, 不考虑流域内水物质蓄存量的变化, 总水物质输入等于总水物质输出与径流量之和, 如式(11)所示:

$$Q_B + Q_W = Q_{B-out} + Q_{W-out} + R_A, \quad (11)$$

式中 Q_B 代表输入的背景水汽通量, Q_{B-out} 代表输出的背景水汽通量, Q_W 是输入的白水通量, Q_{W-out} 代表输出的白水通量, R_A 代表流域径流量. 假设输入和输出的背景水汽通量相同, 即 $Q_B = Q_{B-out}$, 于是有 $Q_W = Q_{W-out} + R_A$, 此时计算式(10)的分母为

$$\int_0^W \overline{q_w} dw = \frac{Q_W + Q_{W-out}}{2} = \frac{Q_W + Q_W - R_A}{2} = Q_W - \frac{1}{2} R_A, \quad (12)$$

将式(12)代入式(10), 得到:

$$WPR = \frac{P_A}{Q_W - \frac{1}{2} R_A}. \quad (13)$$

文献[15]中提到的流域空中水资源的降水转化率 β 的计算公式:

$$\beta = \frac{P}{W_{white} + ET} = \frac{P}{W_{white} + P - R}. \quad (14)$$

该式相比本文提出的式(13)而言缺少依据, 应以本文的式(13)为准. 式(13)的推导过程也存在一定的假设条件, 因此计算得到的值与实际的流域白水降水转化率相比仍会有偏差. 但一般而言, 径流在流域内的产生还是相对均匀的, 同时流域径流量相对白水输入量而言是个小量, 因此采用此公式进行计算产生的误差也可以接受. 如需精确评估流域的白水降水转化率, 可引入白水输送路径^[14]的概念进行精细分析. 需要注意的是, 流域的白水降水转化率表示的是输入某一流域内的白水向降水转化的比例; 这一比例与路径长短有关, 脱离路径长短而比较流域的白水降水转化率的高低是没有意义的.

3 案例分析

3.1 数据来源

随着遥感技术的发展, 全球主要气象机构开展了对空中水物质和云的大量监测, 并进行了数据同化工作, 这些成果是目前空地水物质收支平衡与云水资源/空中水资源分析的数据基础^[11,14,15,20~24,27,29]. 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)等机构采用大气模式同化了全球卫星遥感、探空、地面雷达等数据, 于2007年推出了ERA-Interim再分析数据集^[35], 被大量学者用于大气水汽分析工作^[36~39], 证明了该数据具有较高的可靠性与适用性. 因此, 本文也采用ERA-Interim再分析数据作为空中水物质含量和通量的来源, 所用数据的时间分辨率为6小时, 空间分辨率为 0.25° . 此外, 本文采用了CHIRPS第二版的全球降水插值数据^[40], 空间分辨率为 0.05° , 范围为南北纬 50° 之间.

3.2 我国大陆附近栅格分析

以北纬 50° 以南我国大陆及周边为研究区 ($5^\circ \sim 50^\circ N$, $75^\circ \sim 135^\circ E$), 研究2000~2015年空中水资源相关变量多年均值的分布情况, 如图2所示.

图2 研究区 2000~2015 年空中水资源相关变量多年均值分布. (a) 垂直积分水物质含量; (b) 背景水汽含量; (c) 降水量; (d) 白水通量

Figure 2 The mean annual distribution of atmospheric water resources related variables between 2000 and 2015 in the study region. (a) Total column atmospheric water; (b) total column background water; (c) precipitation; (d) white water flux

按照式(7), 对每个栅格用图2(c)的年降水量除以图2(d)的年白水通量, 可得我国大陆附近白水降水效率的空间分布, 如图3所示。

图3直观地显示了我国不同地区白水降水转化效率的高低, 也反映了白水降水效率与图2中展示的空中水资源相关变量不一样的分布特征。首先, 东南沿海降水量大的地方, 白水降水效率并不是特别高, 约为 $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$; 在青藏高原的东部(横断山脉、四川盆地)和东北部(祁连山脉), 可以达到 $1.0 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$; 青藏高原南部(喜马拉雅山脉南麓)是白水降水效率最高的区域, 存在高于 $2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 的带状或片状区域, 雅鲁藏布江大拐弯附近的降水效

率超过 $3.0 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。从以上结果可以看出, 白水降水效率受山脉的影响显著, 喜马拉雅山南麓、祁连山脉以及天山山脉等都是降水效率较高的地区, 而这些地区往往是大江大河的发源地。

3.3 典型流域分析

选取长江、黄河、珠江、三江源4个流域(片)进行空地耦合的宏观分析。其中, 长江流域为大通水文站以上部分; 黄河流域为花园口水文站以上流域, 包括鄂尔多斯高原内流区; 珠江流域为高要水文站以上部分, 包括越南境内的郁江南源左江上游; 三江源包含3个源区, 黄河源为唐乃亥水文站以上流域, 长

图3 研究区白水降水效率 WPE 分布图

Figure 3 The distribution of white water precipitation efficiency (WPE) in the study region

江源为直门达水文站以上流域, 澜沧江源为昌都水文站以上流域。

分别统计了各流域的面积, 多年平均年水物质输入量、年白水输入量、年降水量; 对各流域栅格的白水降水效率 WPE 进行空间平均得到流域平均的白水降水效率 $\overline{WPE}$, 是对流域内各点的白水降水效率

均值的反映; 采用式(13)计算流域的白水降水转化率 WPR , 是白水降水效率在输送路径积分的体现; 用流域白水降水转化率 WPR 除以流域平均的白水降水效率 $\overline{WPE}$, 得到流域白水输送路径的等效长度 L_w , 其数值大小体现了流域在白水输送方向上的平均纵深。统计结果如表1所示。

表 1 典型流域(片)的空中水资源特征变量

Table 1 The characteristic parameters of atmospheric water resources in typical river basins

	长江	黄河	珠江	三江源
计算流域面积 $A(\text{km}^2)$	1700825	789358	358784	321436
多年平均总水物质输入量 $Q(\text{亿m}^3/\text{a})$	108342	40013	73138	15120
多年平均白水输入量 $Q_w(\text{亿m}^3/\text{a})$	41796	12466	21409	6988
多年平均降水量 $P_A(\text{亿m}^3/\text{a})$	18513	3543	5199	1480
流域平均的白水降水效率 $\overline{WPE}$ (10^{-6} m^{-1})	0.78	0.69	0.61	0.78
流域的白水降水转化率 $WPR(\%)$	50	29	26	22
流域白水输送路径的等效长度 $L_w(\text{km})$	637	416	420	281

由于流域内部的取水会以蒸散发回到空中,因此在计算流域的白水降水转化率 WPR 时采用的是未还原年径流量:长江9050亿 m^3 、黄河263亿 m^3 、珠江2240亿 m^3 和三江源499亿 m^3 .

从空中水资源输入量来看,平均每年输入长江流域的白水量超过4万亿 m^3 ;其次是珠江流域,每年输入约2.1万亿 m^3 ;流域面积是珠江流域2.2倍的黄河流域每年仅输入约1.2万亿 m^3 ;而三江源流域平均每年只输入0.7万亿 m^3 .可以发现,多年平均的空中水资源输入量一方面受所在地区的气候区、地形等影响,另一方面受流域的尺度约束,一般而言,流域越大,白水输入量也越大.

其次,从流域平均的白水降水效率来看,长江流域和三江源具有最高的白水降水效率(从图3的空间分布也可以明显看到),达到了 $0.78 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$;黄河流域次之;珠江流域虽然地处南方,但白水降水效率最低,为 $0.61 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.这显示了不同地区的白水降水效率与空中水资源量、降水量都不太一样的分布规律,与当地的大气环流特征和气候条件有关.

最后,从流域的白水降水转化率来看,长江流域拥有最大的纵深,流域白水输送路径的等效长度高达637 km,再考虑有着非常高的流域平均白水降水效率,因此长江流域的白水降水转化率是最高的,达到了50%.三江源流域具有相等的流域平均白水降水效率,但其白水输送路径的等效长度仅有281 km,白水难以及时在三江源地区内大量转化为降水,其流域的白水降水转化率仅为22%.而流域面积接近三江源2.5倍的黄河流域,白水输送路径的等效长度约等于三江源的1.5倍,但其白水降水转化率也只有29%,较三江源高出不多,这是由于白水降水效率低导致的.流域平均的白水降水效率、流域的白水降水

转化率、流域白水输送路径的等效长度各反映了不同的流域气象水文特征,综合考虑可全面评价流域特性.

4 小结与展望

本文提出了空中水资源的一种定义——白水,指的是统计意义上具备降水潜力的空中水物质通量,给出了其计算方法,推导了表征其降水转化特征的分析方法.基于白水的概念,提出了单点的白水降水效率 WPE (量纲 $[\text{L}^{-1}]$)和流域的白水降水转化率 WPR (无量纲),其中单点的白水降水效率表征的是白水向降水转化的一种公允度量,可用于直观地对比分析不同地区空中水资源的降水转化程度;流域的白水降水转化率可用于分析流域空地水资源循环中的数量关系.两种角度的降水转化分析均有助于开展宏观尺度的水资源研究,是对水资源分析方法的有益补充.

空中水资源概念的提出为水资源的开源提供了一种新的研究思路.参考地表水资源的管理模式,研究空中水资源统筹开发的关键技术,建立相应的水权制度与管理办法,开展空中水资源管理利用的科学试验和实践,提高特定区域的降水转化率,有望打开我国缺水地区水资源开源的新局面.同时,空中水资源的开发利用可以实现白水向绿水和蓝水同时转化,不仅可以解决蓝水短缺问题,同时可以解决绿水短缺问题,对保护和修复生态环境具有良好的作用.

本文工作是对空中水资源概念的浅显分析,空中水资源的形成、输送和降水转化过程仍有待大量深入研究.背景水汽含量的精确评估、白水输送路径的识别与特征分析、白水可利用性评价等应为优先开展的主要工作.

致谢 该文图2, 3涉及地图经由国家测绘地理信息局审核, 审图号: GS(2018)4969.

参考文献

- 1 Shiklomanov I A. Climate and water resources. *Hydrol Sci J*, 1989, 34: 495–529
- 2 Liu C M, Chen Z K. Evaluation of Water Resources and Trend Analysis of Water Supply and Demand in China (in Chinese). Beijing: China Water & Power Press, 2001 [刘昌明, 陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析. 北京: 中国水利水电出版社, 2001]
- 3 Wang H, Qin D Y, Chen X J, et al. Water resources evaluation criterion and calculation caliber (in Chinese). *Water Resour Hydrol Eng*, 2004, 35: 1–4 [王浩, 秦大庸, 陈晓军, 等. 水资源评价准则及其计算口径. 水利水电技术, 2004, 35: 1–4]
- 4 Falkenmark M. Coping with water scarcity under rapid population growth. In: Conference of SADC, Pretoria. 1995
- 5 Falkenmark M, Lannerstad M. Consumptive water use to feed humanity-curing a blind spot. *Hydrol Earth Syst Sc*, 2004, 9: 15–28
- 6 Wang H, Jia Y W, Wang J H, et al. Research on the Yellow River Basin Water Resources and its Evolution (in Chinese). Beijing: Science Press, 2010. 153–154 [王浩, 贾仰文, 王建华, 等. 黄河流域水资源及其演变规律研究. 北京: 科学出版社, 2010. 153–154]
- 7 Baumgartner A, Reichel E. *The World Water Balance*. New York: Elsevier, 1975
- 8 Trenberth K E, Smith L, Qian T, et al. Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *J Hydrometeorol*, 2007, 8: 758–769
- 9 Liu J, Zehnder A J B, Yang H. Global consumptive water use for crop production: The importance of green water and virtual water. *Water Resour Res*, 2009, 45: 641–648
- 10 Cheng G D, Zhao W Z. Green water and its research progresses (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2006, 21: 221–227 [程国栋, 赵文智. 绿水及其研究进展. 地球科学进展, 2006, 21: 221–227]
- 11 Trenberth K E, Fasullo J T, Mackaro J, et al. Atmospheric moisture transports from ocean to land and global energy flows in reanalyses. *J Clim*, 2011, 24: 4907–4924
- 12 Liu G W. *Atmosphere Process in Hydrologic Cycle* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1997 [刘国纬. 水文循环的大气过程. 北京: 科学出版社, 1997]
- 13 Zhang X W, Yang Q, Yang L M. Discussion about atmospheric hydrology (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2004, 15: 679–682 [张学文, 杨青, 杨莲梅. 大气水文学初探. 水科学进展, 2004, 15: 679–682]
- 14 Wang G Q, Zhong D Y, Li T J, et al. Sky River: Discovery, concept, and implications for future research (in Chinese). *Sci Chin Tech Sci*, 2016, 46: 649–656 [王光谦, 钟德钰, 李铁键, 等. 天空河流: 发现、概念及其科学问题. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 649–656]
- 15 Wang G Q, Li T J, Li J Y, et al. Analysis of sky water resources in the source region and the upper-middler region of the Yellow river basin (in Chinese). *Yellow River*, 2016, 38: 79–82 [王光谦, 李铁键, 李家叶, 等. 黄河流域源区与上中游空中水资源特征分析. 人民黄河, 2016, 38: 79–82]
- 16 Zheng G G, Guo X L. Status and development of sciences and technology for weather modification (in Chinese). *Eng Sci*, 2012, 14: 20–27 [郑国光, 郭学良. 人工影响天气科学技术现状及发展趋势. 中国工程科学, 2012, 14: 20–27]
- 17 UNESCO. *World Water Balance and Water Resource of the Earth*. Paris: UNESCO Press, 1978
- 18 Vonder H, Thomas H, Randel D L, et al. A new total and large global water vapor data set. *GEWEX News*, 1994, 4: 8–11
- 19 Liu G W. The time-space distribution of precipitable water over the mainland of China (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 1984, 5: 1–9 [刘国纬. 中国大陆上空可降水的时空分布. 水利学报, 1984, 5: 1–9]
- 20 Grody N. Remote sensing of atmospheric water content from satellites using microwave radiometry. *IEEE T Antenn Propag*, 1976, 24: 155–162
- 21 Drake F. Global cloud cover and cloud water path from ISCCP C2 data. *Int J Climatol*, 1993, 13: 581–605
- 22 Weng F, Grody N C. Retrieval of cloud liquid water using the special sensor microwave imager. *J Geophys Res Atmos*, 1994, 99: 25535–25552
- 23 Solheim F, Godwin J R, Westwater E R, et al. Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods. *Radio Sci*, 1998, 33: 393–404
- 24 Li X Y, Guo X L, Zhu J. Climatic distribution features and trends of cloud water resources over China (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2008, 32: 1094–1106 [李兴宇, 郭学良, 朱江. 中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势. 大气科学, 2008, 32: 1094–1106]
- 25 Benton G S, Estoque M A. Water-vapor transfer over the north American continent. *J Atmos Sci*, 1954, 11: 462–477
- 26 Rasmusson E M. Atmospheric water vapor transport and the water balance of north America. *Mon Weather Rev*, 1968, 96: 403

- 27 Oki T, Musiake K, Matsuyama H, et al. Global atmospheric water balance and runoff from large river basins. *Hydrol Process*, 1995, 9: 655–678
- 28 Liu G W, Zhou Y. Research on water vapor transmission over the mainland of China (in Chinese). *Hydrology*, 1983, 2: 31–35 [刘国伟, 周仪. 中国大陆上空水汽输送的研究. *水文*, 1983, 2: 31–35]
- 29 Cai M. Cloud water resources and precipitation efficiency evaluation over China (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2013 [蔡森. 中国空中云水资源和降水效率的评估研究. 博士学位论文. 北京: 中国气象科学研究院, 2013]
- 30 Braham R R J. The water and energy budgets of the thunderstorm and their relation to thunderstorm development. *J Atmos Sci*, 1952, 9: 227–242
- 31 Hobbs P V, Matejka T J, Herzegh P H, et al. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. I: A Case Study of a Cold Front. *J Atmos Sci*, 1980, 37: 568–596
- 32 Liao R S. The formula of inland water cycle (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 1960, 32: 171–180 [廖荣荪. 论内陆水分循环的公式. *气象学报*, 1960, 32: 171–180]
- 33 Liu G W, Wang J P. A study on hydrologic cycle of land-atmosphere system of China (in Chinese). *Adv Water Sci*, 1997, 8: 99–107 [刘国伟, 汪静萍. 中国陆地-大气系统水分循环研究. *水科学进展*, 1997, 8: 99–107]
- 34 Wang K L, Cheng G D, Jiang H, et al. Atmospheric hydrologic cycle over the Qilian-Heihe valley (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2003, 14: 91–97 [王可丽, 程国栋, 江灏, 等. 祁连山-黑河流域水循环中的大气过程. *水科学进展*, 2003, 14: 91–97]
- 35 Simmons A J, Uppala S M, Dee D P, et al. ERA-interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *Ecmwf Newslett*, 2007, 110: 25–35
- 36 Boilley A, Wald L. Comparison between meteorological re-analyses from ERA-Interim and MERRA and measurements of daily solar irradiation at surface. *Renew Energ*, 2015, 75: 135–143
- 37 Karam H N, Bras R L. Estimates of net atmospheric moisture flux convergence over the Amazon Basin: A comparison of reanalysis products. *J Hydrometeorol*, 2008, 9: 1035–1047
- 38 Qin Y J, Lu C H. Diagnostic study of summer moisture sinks over the Yangtze-Huaihe River basin in 2011 based on high-resolution ERA-Interim reanalysis data (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2013, 37: 1210–1218 [秦育婧, 卢楚翰. 利用高分辨率 ERA-Interim 再分析资料对 2011 年夏季江淮区域水汽汇的诊断分析. *大气科学*, 2013, 37: 1210–1218]
- 39 Xie Q Y, Gong Y F, Yang R, et al. The characteristics of the moist pool over the Tibet Plateau based on ERA-Interim Data (in Chinese). *J Nat Resour*, 2015, 7: 1163–1171 [谢启玉, 巩远发, 杨蓉, 等. 基于 ERA-Interim 资料分析青藏高原“湿池”变化特征. *自然资源学报*, 2015, 7: 1163–1171]
- 40 Chris F, Pete P, Martin L, et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data*, 2015, 2: 150066

Summary for “空中水资源及其降水转化分析”

Atmospheric water resource and precipitation conversion

Jiaye Li¹, Tiejian Li^{1,2,3*}, Guangqian Wang^{1,2,3}, Jiahua Wei^{1,2,3}, Deyu Zhong^{1,2,3},
Yang Su¹ & Xudong Fu¹

¹ State Key Laboratory of Hydrosphere Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China;

³ Sanjiangyuan Collaborative Innovation Center, Xining 810016, China

* Corresponding author, E-mail: litiejian@tsinghua.edu.cn

The concept of water resources is largely limited only to water in rivers, lakes, underground aquifers, and other sources that can be used by humans directly—“blue water”. It does not normally include water that directly evaporates from the land surface and transpires from vegetation—“green water”. Generally speaking, the sum of blue water and green water is equivalent to total precipitation. Considering the global land surface, as much as about 65% of the total precipitation is converted into green water, and only the remaining 35% is converted into blue water. The concept of green water clearly extends the scope of research and management of water resources to the total amount of land precipitation, but the source of terrestrial water resources has not been intensively studied. In terms of a complete water cycle, water resources should refer to the renewal/replenishment of the fluxes of fresh water in different processes in the hydrosphere. The storage of water in the atmosphere is relatively small, but the huge flux of water transport in the atmosphere is the fundamental source of terrestrial water resources.

In the contexts of existing water shortages, future water demands (including for ecological protection), and global climate change impacts on water resources, accurate quantitative studies on the formation of terrestrial water resources from the atmosphere are becoming increasingly important. Such studies require a clear definition of the concept of atmospheric water resource and particular focus on its precipitation conversion. Such research can indeed enhance our theoretical knowledge about the functions of water resources systems and further broaden our view of traditional water resources management.

Motivated by this, the present paper attempts to improve our understanding of atmospheric water resources. This is done through: (1) a review of the concept of atmospheric water resource; (2) proposing a quantitative estimation method for atmospheric water resource; and (3) quantifying the precipitation conversion characteristics of atmospheric water resources.

For a given period of time, we define the atmospheric water resource as the accumulated atmospheric water matter with potential to precipitate, and call it as “white water”. Therefore, in a sense, white water is also a renewable/replenishable flux, whose volume is generally considered over a longer period (e.g., per year). However, since the horizontal transportation of water matter in the atmosphere spreads over the entire sphere (as opposed to surface water that is bounded in one-dimensional river channels), the dimension of white water at one point should be in L^2T^{-1} . With this, for any given point, the quotient of precipitation rate over white water flux is defined as the white water precipitation efficiency (*WPE*) (dimension: L^{-1}). Therefore, the *WPE* refers to the proportion of precipitation converted from white water while transported in unit distance. To calculate the quantity of atmospheric water matter that has the potential to precipitate, a background value should be subtracted from the measured vertically integrated water vapor (*IWV*). In this study, the clear-sky *IWV* of an ordinal day in a year is used as the background value.

With the above, the concept of white water is also extended to surface river basins. In this, the white water flux entering a river basin is defined in the L^3T^{-1} dimension, and the corresponding white water precipitation ratio (*WPR*, dimensionless) is obtained by integrating the *WPE* over each transport path and then calculating the weighted average over all the paths. Therefore, the *WPR* is essentially the proportion of total precipitation in the basin that is converted from the incoming white water.

Finally, the reanalysis data are used to analyze the distribution of white water and the pattern of *WPE* within the range $5^\circ\sim50^\circ N$ and $75^\circ\sim135^\circ E$ region. A comparative analysis of the atmospheric-terrestrial water resources characteristics in the Yangtze River, the Yellow River, and the Pearl River basins, as well as in the Sanjiangyuan region is also conducted. The results show that the *WPE* is a fair measure of the conversion efficiency from white water to precipitation, and the *WPR* in a river basin is useful for quantitative analysis of the atmospheric-terrestrial coupling relationship.

atmospheric water resource, white water, precipitation efficiency, precipitation conversion ratio, atmospheric-earth surface coupling

doi: 10.1360/N972018-00162